



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE DE FAVORABILIDADE PARA EXPLORAÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO – CASA NOVA,
BAHIA**

Stephanie Tavares dos Reis

MONOGRAFIA

BRASÍLIA

2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Stephanie Tavares dos Reis

**ANÁLISE DE FAVORABILIDADE PARA EXPLORAÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO – CASA NOVA,
BAHIA**

**Monografia de especialização em
Geoprocessamento Ambiental apresentada
a banca examinadora do Instituto de
Geociências como exigência para a
obtenção do título de especialista em
Geoprocessamento**

Aprovada em 09/03/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^a. Rejane Ennes Cicerelli (orientadora)

Prof^ª. Dr^a. Tati Almeida (co-orientadora)

Prof^ª. Dr^a. Suzan Pequeno

Prof^ª. Dr. Paulo Roberto Menezes

SUMÁRIO

RESUMO	04
ABSTRACT	06
INTRODUÇÃO	08
ÁREA DE ESTUDO	09
Geologia Regional	11
METODOLOGIA	12
Domínios Hidrogeológicos	16
Pedologia	17
CoKrigagem	18
Lineamentos, drenagens e declividade	19
Precipitação	20
Uso e Ocupação	20
Integração dos Dados	23
RESULTADOS E CONCLUSÃO	25
AGRADECIMENTOS	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Localização do Município de Casa Nova no extremo noroeste do Estado da Bahia, em relação ao Cráton do São Francisco e geologia regional simplificada (adaptado de CPRM, 2004).....</i>	10
<i>Figura 2: Fluxograma das etapas e procedimentos aplicados na metodologia.....</i>	14
<i>Figura 3: (A) Domínios hidrogeológicos, (B) Solos, (C) CoKrigagem, (D) Lineamentos, (E) Precipitação, (F) Rede de Drenagem, (G) Declividade e (H) Uso e Ocupação do Solo.....</i>	22
<i>Figura 4: Mapa de favorabilidade.....</i>	24

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis utilizadas na integração de dados, com seus atributos e respectivos pesos e potencialidade para a ocorrência de água.....	15
Tabela 2: Escala numérica de Saaty (fonte: MARINS, 2009).....	23

RESUMO

Tendo em vista a escassez de recursos hídricos superficiais em regiões semiáridas, as reservas de água subterrânea constituem-se como fontes alternativas de extrema importância para suprir as necessidades diárias dos habitantes dessas localidades. O presente estudo foi desenvolvido com o intuito de integrar informações já existentes e disponibilizadas gratuitamente, tais como dados de poços do SIAGAS, mapa de solos do IBGE, imagens dos satélites Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2 e SRTM 1 Arc-Second Global, dentre outros dados, a fim de se identificar áreas favoráveis à exploração de água subterrânea no município de Casa Nova no extremo noroeste da Bahia, na região do Médio São Francisco. A área de estudo insere-se no contexto da Zona Externa da Faixa de Dobramentos Riacho do Pontal, bordejando a porção setentrional do Cráton do São Francisco, área com expressiva exposição de rochas cristalinas o que torna a ocorrência de uma acumulação hídrica limitada. O trabalho consiste em análise multicritério que tem como propósito aplicar pesos e determinar valores para diferentes variáveis físicas possibilitando assim examinar inúmeros aspectos com ampla distribuição espacial. Foram utilizados oito mapas para a integração de dados cujas características são definidas como essenciais para a ocorrência de reservas de água subterrânea: (1) Hidrogeologia, (2) Solos (3) CoKrigagem ordinária por meio de dados de capacidade específica e vazão dos poços; (4) precipitação média anual; (5) densidade de drenagem; (6) densidade de lineamentos estruturais; (7) declividade do terreno e (8) uso e ocupação do solo. Cada mapa expressa um indicador de favorabilidade para ocorrência de aquíferos locais, sendo que a ordem em que aparecem não necessariamente determina sua importância ou valor nas análises. Os valores dos pesos para a álgebra de mapas foram obtidos através de análise hierárquica

(AHP), onde um grupo de geocientistas foi consultado para que avaliassem as diferentes variáveis e as comparassem entre si. Os resultados adquiridos da integração dos mapas indicam que as áreas com maior favorabilidade para exploração de água subterrânea estão concentradas, principalmente, no sul do município onde ocorrem rochas porosas derivadas de paleodunas e que representam, na presente pesquisa, o domínio intergranular do mapa hidrogeológico, já nas porções dominadas por rochas cristalinas, a presença de água é favorecida, principalmente, pela existência de lineamentos estruturais associados ao fraturamento dessas rochas. Estudos anteriores já apontavam, por meio de dados de poços e trabalhos de campo, a expressiva capacidade de acumulação de água no domínio intergranular, sendo este um aquífero de grandes dimensões. Porém faz-se necessário mais pesquisas de campo a fim de se determinar não apenas a presença de água nos locais apontados com maior favorabilidade, como também para verificar a qualidade desse recurso.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, SIG, Água Subterrânea, Semiárido, Análise Multicritério.

ABSTRACT

Due to the surface water resources shortage in semiarid regions, groundwater reserves constitute alternative sources of extreme importance to provide for daily needs of these areas population. This paper was developed with the aim of integrate already existent and distributed for free informations as SIAGAS groundwater well data, soil maps from IBGE, satellite images Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2 and SRTM 1 Arc-Second Global, among others data. This work focus was to identify propitious areas to groundwater exploration at Casa Nova county, northwest of Bahia, Mid São Francisco region. The study area is inserted in the context of External Zone of Riacho do Pontal Fold Belt, bordering the northern portion of São Francisco Craton. The area has expressive crystalline rocks expositions, therefore the occurrence of water accumulation is limited. The work's method consists in multi-criteria analysis with the porpoise to apply weight and determinate values to different physical proxies enabling the examination of numerous aspects with wide spatial distribution. Eight maps were used to integrate data whose characteristics are defined as essential to the occurrence of groundwater reserves: (1) Hydrogeology, (2) Soil, (3) Ordinary CoKriging by specific capacity and flow of wells data, (4) annual average rainfall, (5) drainage density, (6) structural lineament density, (7) terrain declivity, (8) soil's uses and occupation. Each map expresses a favorability indicator to occurrences of local aquifer. The order in which they occur don't necessarily determinate its importance or value within the analyses. The weight's values for the map's algebra were obtained thought Analytic Hierarchy Process (AHP), in which a group of geoscientists were consulted to evaluate the different proxies and compare each of them. The acquired results on the maps integration indicate that the areas with major favorability to groundwater exploration are

concentrated mainly at south in the county were occurs porous rocks from paleodunes and represent, in this paper, the intergranular domain of the hydrogeological map. In the areas with occurrences of crystalline rocks, the presence of water is favored mainly by the existence of structural lineaments associated with fracturing. Earlier studies, with wells data and field works, indicated the expressive capacity of water accumulation in the intergranular domain, considering a large aquifer. Nevertheless more field ressearch is necessary in order to determinate not only the presence of water in the areas pointed as major favorability as well as to examine the quality of this resource.

Key-words: *Remote Sensing, GIS, Groundwater, Semiarid, Multi-criteria analysis*

INTRODUÇÃO

Embora localizado às margens de um dos maiores lagos artificiais do mundo, alimentado pelo Rio São Francisco, Casa Nova é um dos inúmeros municípios brasileiros que passa por severa crise hídrica motivada pelos longos períodos de estiagem que assolam o sertão brasileiro e que é intensificado por atividades antrópicas que agravam os efeitos da escassez dos recursos hídricos. A baixa precipitação anual somada às altas temperaturas, às características geológicas e à baixa eficiência na distribuição de água, tornam a busca por métodos alternativos para exploração de recursos hídricos algo cada dia mais urgente. Com baixa disponibilidade hídrica superficial durante a maior parte do ano, a exploração de água subterrânea configura-se como importante meio para obtenção do recurso.

O presente estudo foi desenvolvido com o intuito de integrar informações já existentes e disponibilizadas gratuitamente, tais como dados de poços do SIAGAS, mapa de solos do IBGE, imagens dos satélites Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2 e SRTM 1 Arc-Second Global, dentre outros dados, a fim de se identificar áreas favoráveis à exploração de água subterrânea em regiões de clima semiárido.

A metodologia utilizada foi a análise de favorabilidade adaptada de VIDAL (2005), onde ao invés de considerar isoladamente cada variável amostrada, os atributos são divididos em células e correlacionados espacialmente. Para a determinação dos pesos e valores utilizados na análise multicritério, foi utilizada a técnica AHP (*Analytic Hierarchy Process*) teoria inicialmente introduzida por Thomas Saaty (1980) como uma ferramenta efetiva para lidar com decisões complexas como a análise simultânea de múltiplas variáveis físicas possibilitando assim examinar inúmeros aspectos com ampla distribuição espacial. Foram utilizados oito mapas para a integração de dados cujas características são definidas como essenciais para a ocorrência de reservas de água

subterrânea, baseando-se para isso nas variáveis adotadas por MURTHY, 2000 (solos, densidade de drenagens, declividade, precipitação, uso e ocupação do solo e hidrogeomorfologia, que inclui parâmetros geomorfológicos e hidrogeológicos) e VIDAL *et. al.*, 2005 (capacidade específica e lineamentos).

ÁREA DE ESTUDO

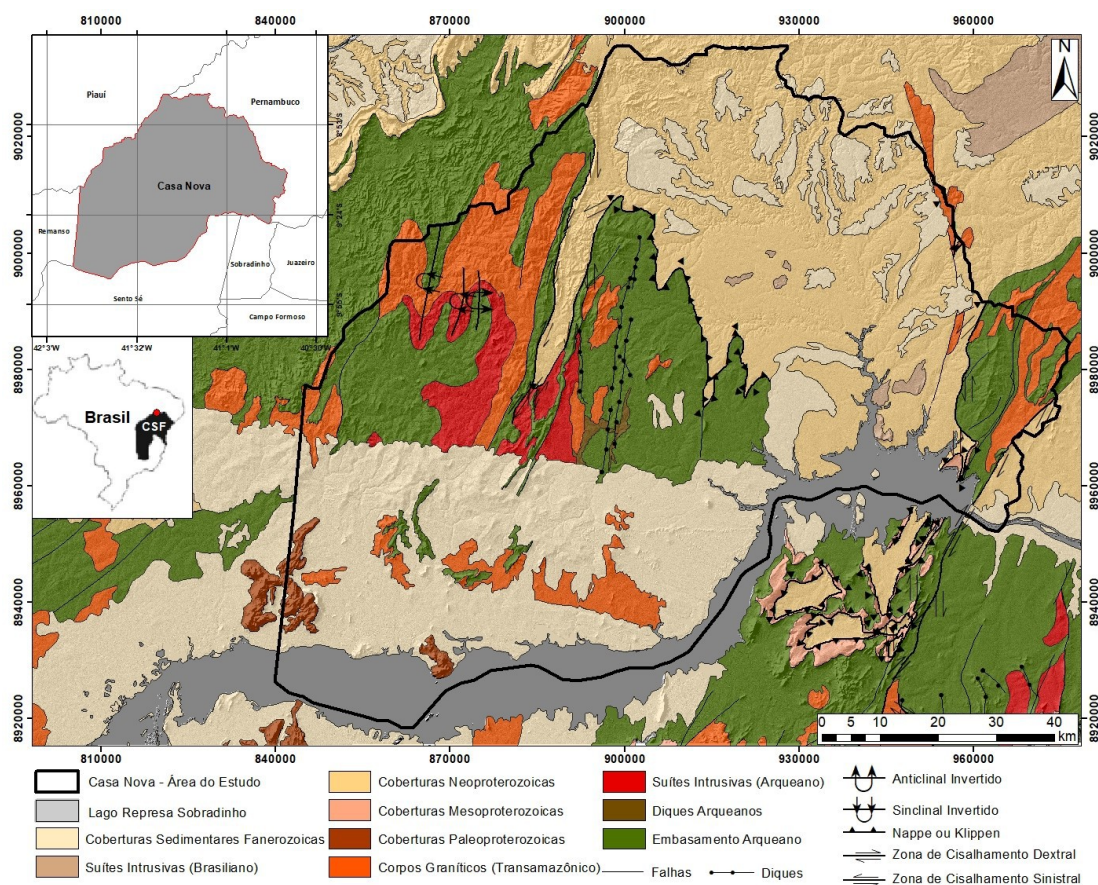
O Município de Casa Nova, com área total de 9.658km², situado no extremo noroeste da Bahia, na região do Médio São Francisco, entre as coordenadas geográficas 40°40' - 41°52'W e 8°52' – 9°41'S. A sul a área é limitada pelos municípios de Sobradinho e Sento Sé, a oeste por Remanso e a norte e nordeste faz divisa com os estado do Piauí e Pernambuco, respectivamente (Figura 1).

A área de estudo é caracterizada por três regiões fisiográficas: os (1) Campos de Areias do Médio São Francisco na porção ocidental, onde prevalecem campos de dunas interiores de morfologia longitudinal e parabólicas, localmente fitoestabilizadas, intercaladas por vales e brejos, além de zonas de espraiamento constituídas por planos arenosos com altitudes variando de 400 a 500m; no segmento setentrional encontram-se os (2) Patamares Sertanejos, cuja constituição atua como um divisor de águas dos rios São Francisco e Parnaíba. A morfologia do revelo é caracterizada por dissecação incipiente, remanescentes de uma superfície de erosão, e áreas dissecadas em lombas e colinas. Na porção oriental da área ocorre a (3) Superfície Petrolina, região plana rampeada em direção ao Vale do São Francisco, com ocorrência de relevos residuais em cristas e morros em cotas altimétricas entre 400 e 500m, preferencialmente alinhadas conforme à litoestrutura (MMA, 2011).

De acordo com a Classificação Climática de Köppen-Geiger o clima da região é caracterizado como das estepes quentes de baixa latitude e altitude (BSh) com

temperaturas médias anuais variando de 23° a 27°C, precipitação anual total inferior a 500mm (MOURA *et al*, 2007) e evapotranspiração potencial anual superior à precipitação, fazendo com que os cursos d'água da região sejam intermitentes, típico de regiões de clima semi-árido. A vegetação predominante na região é a Savana-Estépica Arborizada ou Caatinga, constituída por tipologias vegetais campestres, em geral, com estrato lenhoso decidual e espinhoso com destaque para o xique-xique (*Pilosocereus gounellei*) espécie de cactácea com ampla distribuição no semi-árido brasileiro (IGBE, 2012).

Figura 1: Localização do Município de Casa Nova no extremo noroeste do Estado da Bahia, em relação ao Cráton do São Francisco e geologia regional simplificada (adaptado de CPRM, 2004).



Geologia Regional

A área de estudo está inserida na Zona Externa da Faixa Riacho do Pontal (CAXITO, 2013), no extremo norte do Cráton do São Francisco (CSF) (Figura 1). O CSF abrange uma área de 650.000km², sendo delimitado pelas faixas orogênicas brasileiras: a oeste e sul Brasília; a nordeste Sergipana; a sudeste Araçuaí e a norte pelas faixas Rio Preto e Riacho do Pontal (FUCK et al., 1993).

O embasamento arqueano da área é representado pelas rochas dos complexos Sobradinho-Remanso, Lagoa do Alegre e Rio Salitre. O Complexo Sobradinho-Remanso, unidade basal, é formado por ortognaisses migmatíticos de composição tonalítica a granodiorítica. Nessa unidade verificam-se padrões complexos de redobramento, além de enclaves de rochas metamáfico-metaultramáficas e remanescentes de supracrustais. Sequências do tipo *greenstones belts* pertencentes aos complexos Lagoa do Alegre e Rio Salitre ocorrem recobrando as rochas do embasamento. Os complexos são constituídos, principalmente por formações ferríferas bandadas (BIF) associadas à xistos metamáfico-metaultramáficos, paragnaisses e quartzitos feldspáticos (CPRM, 2014).

As rochas do embasamento são intrudidas pela Suíte Juazeiro-Lagoa do Alegre, também de idade arqueana, caracterizada por ortognaisse migmatítico, de composição granítica a tonalítica e enclaves de rochas do embasamento. Ocorrem ainda diques de rochas metabásicas e metaultrabásicas metassomatizadas, e pegmatitos. Durante o Ciclo Transamazônico, corpos graníticos da Suíte Fazenda Forte, de composição variando de monzogranito a sienogranito intrudiram o embasamento. Esses corpos, em geral são formados por rochas de granuação fina a média e apresentam enclaves de rochas do embasamento (CPRM, 2014).

Na área de estudo a Faixa Riacho do Pontal é representada pelo Grupo Casa

Nova (meso/neoproterozoico), composto pelas formações Barra Bonita e Mandacaru, caracterizando o Sistema de Nappes Casa Nova (CAXITO, 2013). A Formação Barra Bonita é composta por biotita xistos, mármore e quartzitos, interpretados como depositados em ambiente marinho plataformar (UHLEIN *et al*, 2013). A Formação Mandacaru, por sua vez, é representada por granada-mica xisto, níveis de metagraucavas e horizontes centimétricos a métricos de mármore (CPRM, 2014). A ocorrência de estratificação gradacional nesta unidade sugere deposição e ambiente de mar profundo (UHLEIN *et al*, 2013). Durante o Evento Brasileiro essas unidades foram intrudidas pelas rochas graníticas da Suíte Serra da Esperança.

As coberturas cenozoicas (< 2,6 Ma) superficiais são caracterizadas na área, principalmente por depósitos eólicos continentais constituídos por sedimentos de matriz arenosa que formam paleodunas e lençóis de areia de provável idade plio/pleistocênica (DINIZ, J. A. O. & DE LIMA, J. B. 2008). As paleodunas podem variar de poucos metros de altura (5-10m) até dunas de grande porte (50-60m), em geral variando de 15 a 25m. Horizontalmente essas dunas apresentam grande espacialização com dimensões que vão, comumente, de 1-3km até megadunas parabólicas de comprimento superior a 10km (BARRETO *et al.*, 2002). Essas coberturas cenozoicas são interpretadas como de grande potencial para ocorrência de água, devido suas características hidrogeológicas.

METODOLOGIA

A presente pesquisa aborda a análise de favorabilidade que consiste em uma metodologia estatística baseada na probabilidade bayesiana e adaptada de VIDAL *et al*. (2005), onde em vez de considerar isoladamente cada variável amostrada, os atributos são divididos em células e correlacionados espacialmente sendo muito utilizada em programas exploratórios pois indica a existência de depósitos minerais ou acumulações.

Segundo ROSTIROLLA, 1997 o propósito da análise de favorabilidade é determinar as áreas com as maiores chances para descobertas de uma acumulação.

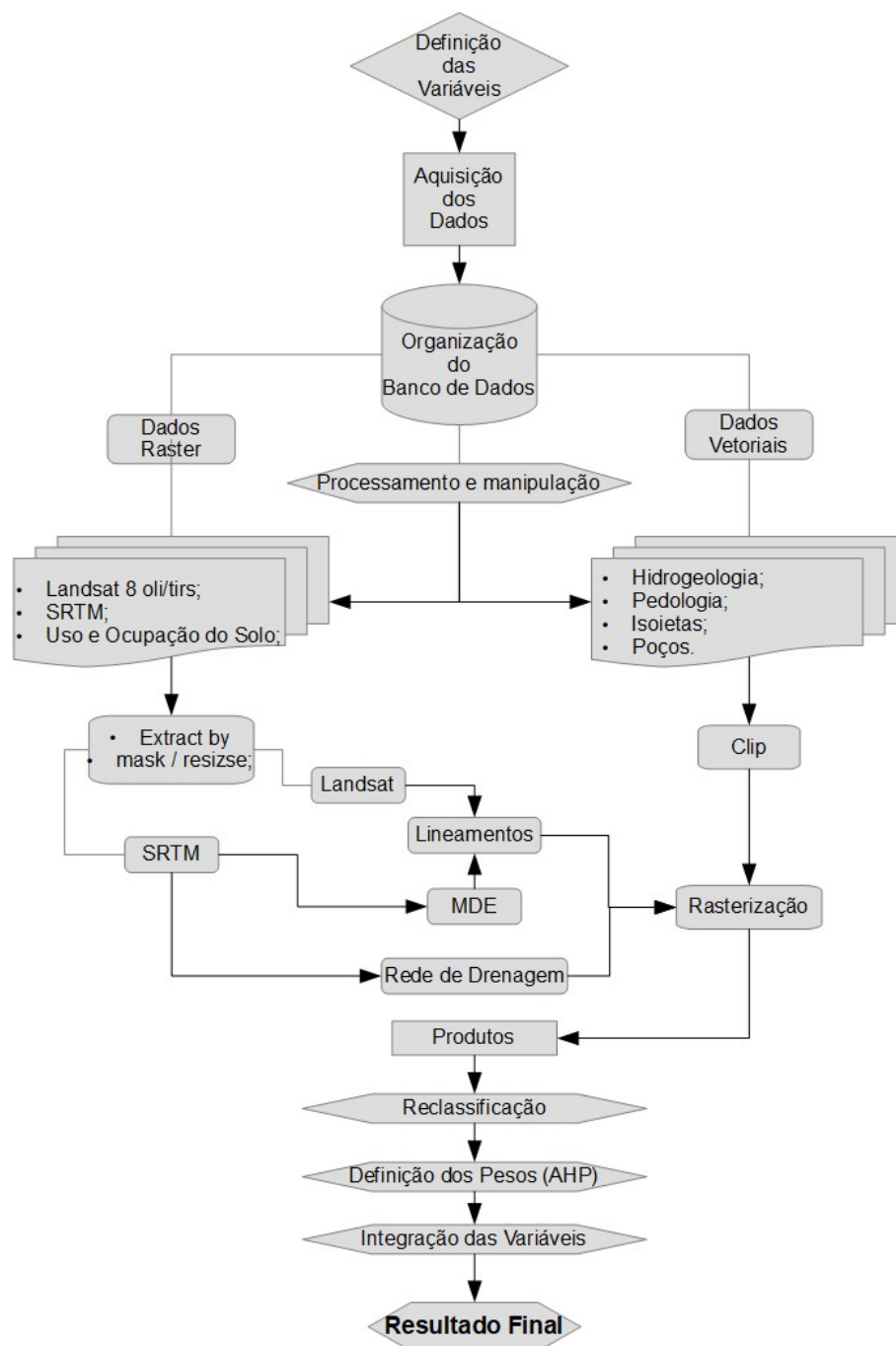
Na análise de favorabilidade é estabelecido um modelo de ocorrência da acumulação que se pretende avaliar e então determinadas as evidências favoráveis para a ocorrência do bem ou acumulação. Neste trabalho foram utilizadas algumas das evidências utilizadas por MURTHY, 2000 dentre outras e a partir delas foram criados 8 mapas baseados nas variáveis hidrogeologia, pedologia, CoKrigagem de dados de poços, precipitação média anual, densidade de drenagem, densidade de lineamentos estruturais, declividade do terreno e uso e ocupação do solo. Todas as propriedades ou atributos dos mapas temáticos foram considerados para a classificação e serão discutidos posteriormente em tópicos ressaltando suas características e designando pesos de acordo com suas potencialidades para infiltração e acúmulo de reservas de água. Os pesos foram classificados em cinco categorias convencionada em probabilidade (1) muito baixa, (2) baixa, (3) média, (4) alta e (5) muito alta como mostra a Tabela 1. As etapas e procedimentos realizados na metodologia deste trabalho estão sumarizados no fluxograma da Figura 2.

A primeira etapa do trabalho consistiu na definição e aquisição dos dados referentes às variáveis julgadas como essenciais para a existência de possível acumulação de água em um terreno. Esses dados foram separados em conjuntos de dados vetoriais ou raster para diferentes processamentos e manipulações. Alguns dados vetoriais foram obtidos por meio de imagens dos satélite Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2 e SRTM 1 Arc-Second Global adquiridos do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), como foi o caso dos lineamentos geológicos e rede de drenagem.

Inicialmente foi feito um mosaico com as imagens de satélite e em seguida recorte na área de interesse. A partir da imagem do SRTM foi possível obter a rede de

drenagem que foi utilizada para confeccionar o mapa de densidade de drenagens, a imagem do SRTM também foi utilizado para criar um modelo digital de elevação (MDE) usado para gerar o mapa de declividade da área e também para auxiliar, junto com a imagem do Landsat a extração dos lineamentos estruturais.

Figura 2: Fluxograma das etapas e procedimentos aplicados na metodologia.



Todos os dados vetoriais foram transformados em raster e tiveram seus atributos reclassificados para que fosse possível fazer a álgebra de mapas. A integração dos dados por meio da álgebra de mapas necessita que cada uma das variáveis escolhidas recebam um peso. Para definir de forma arbitrária os pesos das variáveis na análise multicritério, foi feita uma consulta em grupo para definir a hierarquiação das variáveis (Analytic Hierarchy Process – AHP). A seguir são detalhadas as fontes onde foram obtidos os dados, características das variáveis e de seus atributos.

Tabela 1: Variáveis utilizadas na integração de dados, com seus atributos e respectivos pesos e potencialidade para a ocorrência de água.

Variável	Atributo	Peso	Potencialidade
Domínios Hidrogeológicos	Intergranular	5	Muito Alta
	Coberturas Proterozoicas	3	Média
	Embasamento	2	Baixa
Solos	Neossolos Quartzarênicos	5	Muito Alta
	Latosolos Amarelos	4	Alta
	Latosolos Vermelho-Amarelos	4	Alta
	Argissolos Vermelho-Amarelos	3	Média
	Neossolos Litólicos	1	Muito Baixa
Capacidade Específica (m³/h/m)	1,250001 - 2,133779	5	Muito Alta
	0,746430 - 1,250000	4	Alta
	0,293735 - 0,746429	3	Média
	0,094119 - 0,293734	2	Baixa
	0,001667 - 0,094118	1	Muito Baixa
Lineamentos	Principais	4	Alta
	Secundários	3	Média
Precipitação (mm/ano)	700mm	5	Muito Alta
	600mm	4	Média
	500mm	3	Baixa
Densidade de Drenagem (m²)	4,042446137 - 5,053057671	5	Muito Alta
	3,031834603 - 4,042446136	4	Alta
	2,021223069 - 3,031834602	3	Média
	1,010611535 - 2,021223068	2	Baixa
	0 - 1,010611534	1	Muito Baixa
Declividade (%)	< 8	5	Muito Alta
	> 8	3	Média
Uso e Ocupação do Solo	Formações Florestais	5	Muito Alta
	Formações Savânicas	5	Muito Alta
	Vegetação Campestre	4	Alta
	Uso Agropecuário	3	Média
	Pastagem	3	Média
	Infraestrutura Urbana	2	Baixa

Domínios Hidrogeológicos

O mapa de domínios hidrogeológicos (Figura 2A), utilizado neste trabalho foi elaborado pela Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2004 com um nível de detalhe compatível com a escala 1:250.000, obtido a partir do mapa geológico em escala 1:1.000.000, onde as unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas foram reunidas e agrupadas em entidades denominadas domínios, tendo como base as características litológicas das rochas.

Na área de estudo foram identificados três domínios hidrogeológicos, um com constituído formações cenozoicas, denominado de Formações Cenozóicas, que neste trabalho convencionou-se chamar de Domínio Intergranular e dois domínios formados por aquíferos fissurais, os domínios Cristalino (embasamento) e Metavulcânicas-metassedimentares (formações fanerozóicas).

O Domínio Intergranular é dominado por rochas sedimentares relacionadas temporalmente aos períodos Terciário e Quaternário caracterizados por depósitos eólicos, aluviões, coluviões, areias litorâneas, depósitos fluvio-lagunares, arenitos de praias, depósitos de leques aluviais, de pântanos e mangues, coberturas detríticas, lateríticas e coberturas residuais (BOMFIM, 2010). Esses depósitos tem comportamento hidrogeológico de aquífero poroso com porosidade primária elevada, principalmente nos terrenos arenosos. Os poços nesse domínio produzem vazões significativas a depender da espessura das camadas e da razão areia/argila. Há a ocorrência de um expressivo campo de dunas fósseis, em região a sul de Casa Nova entre os municípios de Barra e Pilão Arcado, onde DINIZ J. A. O. & de LIMA J. B. 2008, por meio de dados de sondagens elétricas verticais (in BARRETO *et al.* 2002) e de precipitação, estimam uma reserva reguladora, de 490.000.000m³/ano para o aquífero. Semelhante área com campo de dunas fósseis ocorre em área de dimensões expressivas no sul de Casa Nova.

Em consequências dessas características esse domínio foi classificado no mapa de Domínios Hidrogeológicos com maior favorabilidade para ocorrência de acúmulos de água (favorabilidade muito alta).

No Domínio Cristalino, foram agrupadas as rochas intrusivas e do embasamento como granitóides, gnaisses, granulitos, migmatitos e rochas máfico-ultramáficas que constituem aquíferos fissurais caracterizados por porosidade primeira muito baixa. Domina a porosidade secundária ocasionada por fendas e fraturas formando aquíferos anisotrópicos de pequena extensão e descontínuos, isso faz com que as vazões produzidas nos poços desse domínio sejam muito baixas e devido à baixa circulação hídrica nas fraturas, as águas são, geralmente, muito salinizadas. Esse domínio apresenta a menor favorabilidade para exploração de água subterrânea.

O Domínio das Coberturas Fanerozóicas é representado por rochas metassedimentares e metavulcânicas. Assim como o Domínio Cristalino, as Coberturas Fanerozóicas constituem aquíferos fissurais, contudo, apesar de apresentar comportamento hidrogeológico semelhante ao Cristalino, foi convencionada uma separação entre esses domínios, visto que rochas metassedimentares e metavulcânicas apresentam comportamentos reológicos distintos com estruturação e competência que iram favorecer a existência de fendas e fraturas nesse domínio.

Pedologia (solos)

Com um nível de detalhe compatível com a escala 1:250.000, o mapa de solos (Figura 2B) da área foi obtido por meio do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a partir da folha SC.24 (Aracaju) disponível para consulta desde 2004. No município de Casa Nova foram identificados cinco classes de solos, neossolos quartzarênicos, latossolos amarelos, latossolos vermelho-amarelos,

argissolos vermelho-amarelos e neossolos litólicos.

Dentre os solos encontrados na região, os neossolos quartzarênicos receberam o maior peso na classificação por serem solos com presença de lençol freático elevado durante grande parte do ano, sendo imperfeitamente ou mal drenados, são solos basicamente quartzosos, com fração areia grossa e areia fina, 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala (SANTOS *et al*, 2013).

Os latossolos amarelos e vermelho-amarelos foram classificados com favorabilidades alta para ocorrência de água. São solos muito intemperizados, profundos, perfis muito homogêneos e de boa drenagem, diferenciando-se entre si pela coloração e teores de óxidos de ferro (SOUSA, 1995).

Os argissolos têm como característica principal o aumento da fração argila a medida que passa de um horizonte superficial para um subsuperficial (SOUSA, 1995), por esse motivo foram classificados com média probabilidade para a ocorrência de água. São solos de profundidade variável, de pouco profundos a profundos.

Os neossolos litólitos ocorrem nas regiões de relevos muito acidentados de morrarias e serras. São solos pouco espessos com 90% ou mais de seu volume formado por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2mm (SANTOS *et al*, 2013). Por esses motivos foi classificado nesse trabalho como o menos favorável para existência de água.

CoKrigagem

A partir de dados de 192 poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) foi feito o cálculo da capacidade específica dos poços dividindo o valor da vazão pela diferença entre o nível dinâmico e o nível estático, sendo este cálculo referente à quantidade de água no poço por unidade de tempo e de

rebaixamento ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$). A capacidade específica é influenciada pelas características do tipo de reservatório (VIDAL, *et al.*, 2005). Foram testados diversos métodos geoestatísticos para a interpolação dos dados, e o que mostrou os melhores resultados foi a CoKrigagem ordinária com transformação logarítmica e semivariograma esférico com anisotropia verdadeira, onde a capacidade específica dos poços foi analisada como variável primária e a vazão como secundária.

Lineamentos, Drenagem e Declividade

Os mapas de lineamentos estruturais (Figura 2D), rede de drenagem e de declividade do terreno (Figura 2G) foram obtidos a partir do processamento e manipulação de imagens dos satélites Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2 (2 imagens) e SRTM 1 Arc-Second Global (4 imagens) com resolução espacial de 30m.

O mapa de lineamentos (Figura 2D) foi obtido por meio de processamento de imagens dos satélites Landsat e SRTM. Inicialmente foi feita uma fusão espectral Gram-Schmidt das bandas multiespectrais (30x30m) com a banda pancromática (15x15m) com objetivo de se obter melhor resolução espacial nas composições RGB. Posteriormente os lineamentos principais, os que eram mais aparentes na imagem, foram traçados sobre feições retilíneas, tendo como base uma composição colorida com as bandas 432. Para os lineamentos secundários (menos aparentes) foi utilizada, junto com a composição RGB, o MDE com ângulo de iluminação a 45° de elevação, 315° de azimute para resaltar feições do relevo. Na classificação os lineamentos principais receberam um peso maior pois, em geral, representam zonas de fratura, onde a ocorrência de água será favorecida.

O mapa de densidade de drenagem (Figura 2F) foi gerado por meio de ferramenta de análise espacial hidrológica de dados matriciais da imagem do SRTM,

onde primeiramente foi aplicado um filtro com a intenção de remover pequenas imperfeições nos dados geradas por buracos e picos (*sinks* e *peaks*), em seguida é gerado um raster com a direção de fluxo e a partir desse o fluxo acumulado. Posteriormente é aplicada uma condicional no raster gerado para eliminar o excesso de informações. O raster final foi então convertido em produto vetorial para que fosse gerado o mapa de densidade de drenagens que foi reclassificado em 5 classes de acordo com a área ocupada por m².

O mapa de declividade (Figura 2G) foi confeccionado a partir da reclassificação do MDE onde foi levada em consideração a declividade do terreno em porcentagem, onde as áreas com declividade baixa (< 8%) são as mais favoráveis para a existência de acúmulos de água, tratando-se também das mais propícias para infiltração e recarga, sendo essas condições prejudicadas com o aumento da inclinação do relevo.

Precipitação

O mapa de isoietas (precipitação média anual) (Figura 2E) em escala 1:5.000.000 foi obtido por meio do Atlás Pluviométrico do Brasil – CPRM com dados de estações pluviométricas de 1977 a 2006. A utilização desse tipo de informação se mostra necessária pois a existência e distribuição de recursos hídrico tem como principal motor a ocorrência de chuvas. Foram identificadas precipitações anuais variando de 500 a 700mm/ano sendo classificados com favorabilidade média a muito alta, respectivamente.

Uso e Ocupação do Solo

Os dados utilizados na confecção do mapa de uso e ocupação do solo (Figura 2H) foram obtidos na plataforma livre MapBiomas que disponibiliza anualmente mapas

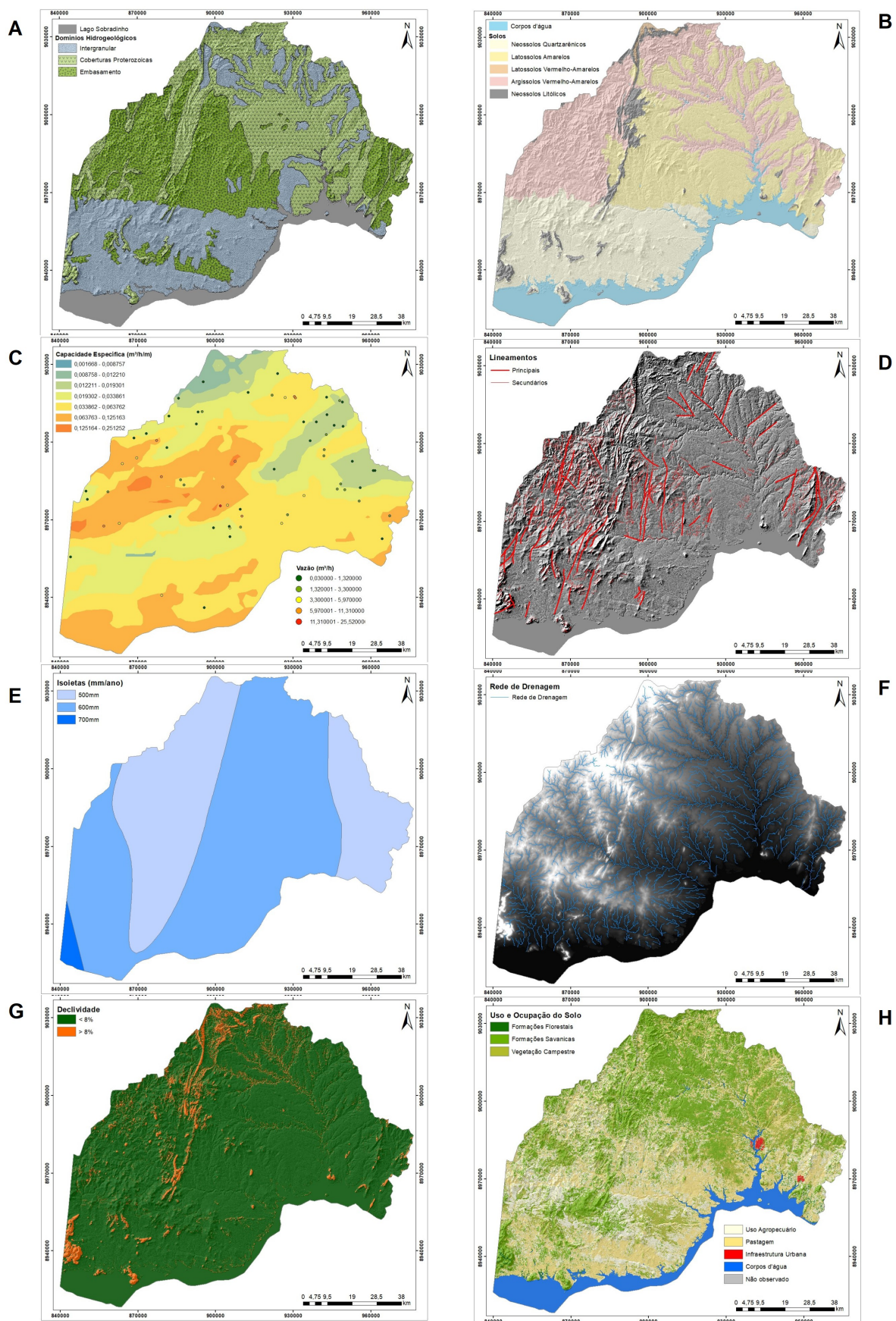
de cobertura e uso do solo no Brasil em escala aplicável até 1:100.000 em formato matricial com resolução de 30m. Para o presente estudo utilizou-se os dados referentes ao bioma Caatinga, onde seus atributos foram reclassificados mediante avaliação de suas características e o quanto essas impactam em parâmetros como escoamento superficial (run-off), evapotranspiração, infiltração e recarga, afetando consequentemente a ocorrência de recursos hídricos subterrâneos.

Formações florestais e savânicas foram classificadas como tendo favorabilidade muito alta para ocorrência de água por serem áreas associadas a solos mais profundos e por apresentarem menor porcentagem de evapotranspiração, sendo excelentes locais para infiltração e recarga.

Áreas com vegetação campestre receberam peso menor (4) que o das formações florestais por serem zonas onde o tipo de vegetação favorece menos nos parâmetros que influenciam a recarga dos aquíferos.

As áreas utilizadas para atividades voltadas para uso agropecuário e pastagens foram classificadas com favorabilidade mediana (3) e as áreas urbanas com baixa (2), pois apresentam run-off mais elevado que das áreas anteriores devido a compactação e impermeabilização dos solos nesses locais e à menor possibilidade de infiltração e recarga dos aquíferos.

Figura 3: (A) Domínios hidrogeológicos, (B) Solos, (C) CoKrigagem, (D) Lineamentos, (E) Precipitação, (F) Rede de Drenagem, (G) Declividade e (H) Uso e Ocupação do Solo.



Integração dos Dados

Para a integração dos dados foi utilizado o método multicritério de análise hierárquica (Analytic Hierarchy Process - AHP) em função de sua flexibilidade quando aplicado a problemas de tomada de decisão. Segundo MARINS (2009) o método AHP baseia-se (i) na estruturação de níveis hierárquicos, sendo o primeiro nível correspondente ao propósito do problema (ocorrência de reservatórios de água subterrânea), o segundo aos critérios (variáveis físicas que controlam a ocorrência de reservas de água) e o terceiro às alternativas (atributos das variáveis); na (ii) definição de prioridades onde os elementos de um nível são julgados par a par (julgamentos paritários) compondo as matrizes de julgamento com escala numérica de Saaty apresentadas na Tabela 2 (TREVIZANO & FREITAS, 2005); e (iii) no estabelecimento de relações entre objetos ou ideias de forma que sejam coerentes, e apresentem consistência lógica (SAATY, 2000 *apud* MARINS, 2009). Dessa forma o método visa calcular a Razão de Consistência dos julgamentos (RC). O valor de RC é obtido da divisão do Índice de Consistência (IC) pelo Índice de Consistência Randômico (IR). IC é dado por $IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1)$, onde $\lambda_{\text{máx}}$ é o maior auto valor da matriz de julgamentos e IR é obtido para uma matriz recíproca de ordem n, com elementos não negativos e gerada aleatoriamente (MARINS, 2009). Definidos os pesos, a álgebra de mapas foi calculada da seguinte forma:

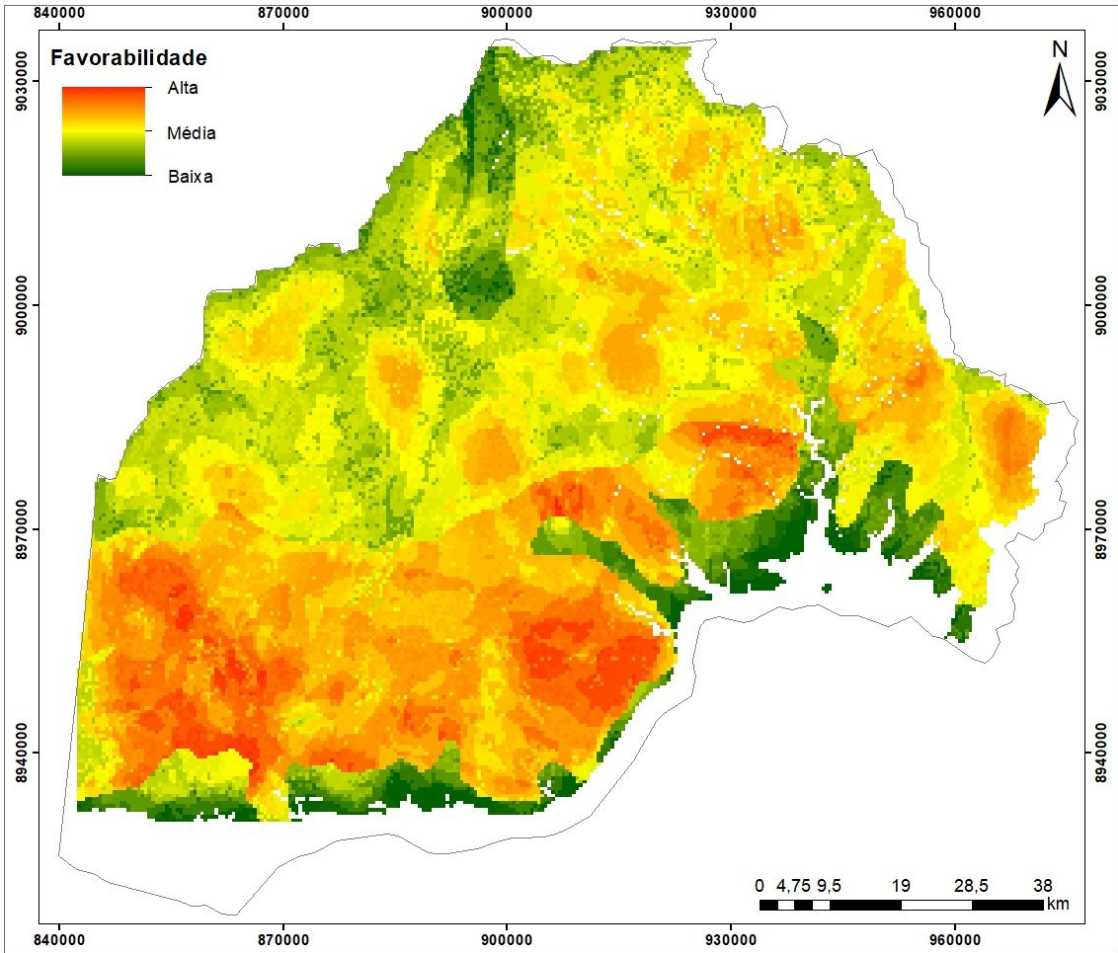
$$\begin{aligned} & \underline{[Hidrogeologia*(0,326) + Solos*(0,088) + Uso do Solo*(0,03) + Drenagem*(0,086) +} \\ & \underline{\text{Lineamentos}*(0,157) + \text{Eficiência dos Poços}*(0,165) + \text{Precipitação}*(0,103) +} \\ & \underline{\text{Declividade}*(0,045) = 1} \end{aligned}$$

com RC = 0,046 ou 4,6%.

Tabela 2: Escala numérica de Saaty (fonte: MARINS, 2009).

Escala numérica	Escala verbal	Explicação
1	Ambos elementos são de igual importância.	Ambos elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões.
Incremento 0.1	Valores intermediários na graduação mais fina de 0.1.	Usados para graduações mais finas das opiniões.

Figura 4: Mapa de favorabilidade



RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise do produto final gerado pela integração dos dados mostra que as áreas que apresentam a maior favorabilidade para exploração de água subterrânea, encontram-se, principalmente na porção sul do município, onde predominam aquíferos livres constituídos de rochas porosas, sendo uma fonte com grande potencial para atender a demanda de atividades domésticas, urbanas e agropecuárias. Nas porções onde predominam aquíferos fissurais, a ocorrência de água é favorecida, em geral, por fraturamento das rochas, em particular nas porções marcadas pelos lineamentos principais, aqueles que formam um zoneamento de fraturas.

Além do citado, faz-se necessário mais pesquisas de campo a fim de se determinar não apenas a presença de água nos locais apontados com maior favorabilidade, como recomenda-se também, devido às características geológicas e climáticas da região, a obtenção de dados acerca das qualidades químicas da água, visto que ocorrem áreas de dimensões expressivas, onde algumas características físicas podem favorecer a salinização desse recurso.

O produto final gerado mostrou-se bastante “pixelado” (Figura 3), isso pode ter ocorrido devido a diferença de escala entre os mapas utilizados na integração dos dados. O produto que gerou maior interferência na anisotropia dos resultados foi o de uso e ocupação dos solos, por ter uma espacialização dos pixels mais randômica que das outras variáveis utilizadas. O ideal seria gerar novo mapa de uso e ocupação do solo em escala mais aproximada a dos demais mapas.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília envolvidos no desenvolvimento e realização do curso de pós-graduação *lato sensu* em geoprocessamento ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 4, p. 349-364. 1997

BARRETO, A. M. F., SUGUIO, K., OLIVEIRA, P. E., & TATUMI, S. H. Campo de Dunas Inativas do Médio Rio São Francisco, BA – Marcante Registro de Ambiente Desértico do Quaternário Brasileiro. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM, Serviço Geológico do Brasil-CPRM e Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos-SIGEP. 2002.

BOMFIM L. F. C. Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil em Ambiente SIG: Concepção e Metodologia. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16., 2010, São Luís. Anais... São Luís: [s.n.], 2010.

CAXITO, F. A., UHLEIN, A. Arcabouço Tectônico e Estratigráfico da Faixa Riacho do Pontal, Divisa Pernambuco-Piauí-Bahia. Geonomos, v. 21, n. 2, p. 19-37. 2013.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Casa Nova (SC.24-V-C-II): carta geológica, escala 1:100.000. [Salvador]: CPRM, 2014. 1 mapa, color. 2014.

DINIZ J. A. O. & de LIMA J. B. O Aquífero de Dunas da Região do Médio São Francisco – BA. *Águas Subterrâneas*. 2008

FUCK, R. A., JARDIM DE SÁ, E. F., PIMENTEL, M. M., DARDENNE, M. A., & PEDROSA-SOARES, A. C. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. *O Cráton do São Francisco*, 161-185. 1993.

MARINS, C.S; SOUZA, D.O; BARROS, M.S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. *XLI SBPO*, v. 1. 2009.

MARTINS, L. & CAVARARO, R. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Sistema Fitogeográfico. Inventário das Formações Florestais e Campestres. Técnicas e Manejo de Coleções Botânicas. Procedimentos para Mapeamentos. IBGE. Rio de Janeiro. 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. MMA. Brasília. 2011.

MOURA, M.S.B.; GALVINCIO, J.D.; BRITO, L.T.L.; SOUZA, L.S.B.; SÁ, I.I.S.; SILVA, T.G.F. Clima e Água de Chuva no Semi-árido. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE), 2006.

MURTHY, K. S. R. Ground water potential in a semi-arid region of Andhra Pradesh-a geographical information system approach. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no 9, p. 1867-1884. 2000.

M.S.B. de; GAMA, G.F.B. (Ed.). Potencialidades da Água de Chuva no Semiárido Brasileiro. Petrolina: Embrapa Semiárido. cap. 2, p. 37-59. 2007.

ROSTIROLLA, S. P. Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória. Ver. Brás. Geoc., 27:327-338. 1997

SAATY, T.L. Decision Making for Leaders. Pitts burg, USA: WS. Publications. 2000.
in: MARINS, C.S; SOUZA, D.O; BARROS, M.S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. XLI SBPO, v. 1. 2009.

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília: Embrapa. 353P, 2013.

SOUZA, C. G. Manual técnico de pedologia. IBGE, 1995.

TREVIZANO, W.A.; FREITAS, A.L.P. Emprego do Método da Análise Hierárquica (AHP) na seleção de Processadores. XXV Encontro Nac. de Engenharia de Produção—Porto Alegre, 2005.

VIDAL, A. C., ROSTIROLLA, S.P., KIANG, C.H. Análise de favorabilidade para a exploração de água subterrânea na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. Revista

Brasileira de Geociências, v. 35, n. 4, p. 475-481. 2005.

UHLEIN, A.; CAXITO, F. A, SANGLARD, J. C. D., UHLEIN, G. J., & SUCKAU, G.
L. Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozóicas da porção norte do Cráton do
São Francisco. Revista Geonomos, 19(2). 2013.